

基于 Tapio 和 LMDI 的天津市产业用水量与经济发展脱钩及驱动因素研究

董思琼, 韩旭, 康婧, 白雪, 袁杰, 朱金亮, 李金中

(天津市水利科学研究院)

摘要:为探究天津市经济发展与产业用水量的脱钩状态及驱动因素,采用 Tapio 脱钩模型分析了 2020—2023 年天津市产业用水量与经济发展脱钩状态的空间差异及产业差异,并利用 LMDI 分解模型分析了影响天津市及各区产业用水量变化的主要驱动因素。结果表明:天津市产业用水量与经济发展脱钩状态较好,从全市来看,2020—2023 年天津市生产总值与产业用水量均处于强脱钩状态,第一、二、三产业产值与用水量也全部实现脱钩,单位水资源效益效应是抑制总产业和第一、二、三产业产值与用水量脱钩的主要因素,技术效应是促进总产业和第一、二产业产值与用水量脱钩的主要因素,人口规模效应是促进总产业和第三产业产值与用水量脱钩的主要因素;从各区来看,2023 年各区生产总值与产业用水量均实现脱钩,但各区不同产业经济发展与用水量脱钩状态、不同产业用水量驱动因素均存在差异。因此,天津市应针对特定区域的薄弱产业制定切实可行的水资源节约、集约利用提升方案,进一步优化产业结构,推动天津市经济高质量发展。

关键词:Tapio 脱钩模型;LMDI 分解模型;产业用水量;经济发展;天津市

Decoupling analysis and driving factor decomposition of industrial water consumption and economic development in Tianjin based on Tapio and LMDI model//Dong Siqiong, Han Xu, Kang Jing, Bai Xue, Yuan Jie, Zhu Jinliang, Li Jinzhong(Tianjin Water Conservancy Research Institute)

Abstract: To explore decoupling state and driving factors between economic development and industrial water consumption in Tianjin, this study adopts Tapio decoupling model to analyze spatial and industrial disparities in decoupling relationship between industrial water consumption and economic growth across Tianjin from 2020 to 2023. Logarithmic mean divisia index (LMDI) decomposition model is further applied to identify core driving factors governing changes in industrial water consumption at both municipal and district levels of Tianjin. The results reveal a favorable decoupling relationship between industrial water use and economic development in Tianjin. At the municipal level, Tianjin's gross domestic product (GDP) maintained a strong decoupling status from industrial water consumption throughout 2020 to 2023, with decoupling achieved across the primary, secondary and tertiary industries alike. Water resource efficiency per unit output acts as the primary factor restraining decoupling for total industrial water consumption as well as water use in all three industries. Technological effect serves as the major driver facilitating decoupling of total industrial water consumption and water use in the primary and secondary industries, while the population scale effect dominates decoupling of total industrial water consumption and water use in the tertiary industry. At district level, all districts realized decoupling between industrial output value and industrial water consumption in 2023. Nevertheless, distinct disparities exist among districts in terms of decoupling status between economic growth and water consumption for individual industries, as well as the driving factors of water use in different sectors. Accordingly, Tianjin should formulate targeted and practical schemes for water conservation and intensive utilization tailored to underperforming industries in specific districts, further optimize its industrial structure, and advance high-quality economic development citywide.

Key words: Tapio decoupling model; LMDI decomposition model; industrial water use; economic development; Tianjin

水资源是国民经济发展的基础性资源与生产要素,对保障生产、生活具有重大作用^[1]。我国是水资源严重短缺的国家,人均水资源量仅为世界平均水平的 35%,水资源空间分布与区域经济、人类活

基金项目:京津冀环境综合治理国家科技重大专项(2025ZD1204600)
作者简介:董思琼(1993—),女,工程师,硕士,主要从事水资源高效利用研究。E-mail:slrdsq@163.com
通信作者:李金中(1970—),男,正高级工程师,博士,主要从事水环境治理与水生态修复研究。E-mail:1229572835@qq.com

动布局不相一致,一些地区的水资源短缺已严重影响了区域经济社会的可持续发展^[2-4]。党的十八大以来,习近平总书记提出城市发展要贯彻以水定城、以水定地、以水定人、以水定产的“四水四定”原则,助推城市经济社会、人口规模、土地利用和产业高质量发展^[5]。因此,深入研究城市产业用水量与经济发展的关系,对实现水资源可持续利用、助推经济高质量发展具有重要意义。

脱钩是衡量资源利用效率的方式之一,对实现流域和城市可持续发展至关重要^[6-7]。脱钩理论由经济合作与发展组织(OECD)提出,用来描述经济增长与资源消耗之间的关系。近年来,相关学者基于Tapio脱钩模型对碳排放^[8-9]、水资源利用^[10-11]、经济增长^[12-14]之间的相关关系进行了较多研究。在用水驱动因素研究方面,对数平均迪氏指数(logarithmic mean divisia index, LMDI)分解法凭借运用简便、不产生残差、全分解和解决零值问题的优点,被认为是最优的分解方法^[15]。刘羽等^[16]采用Tapio脱钩模型分析了珠江三角洲城市群2009—2019年经济增长与用水量的脱钩时空变化特征,并基于LMDI分解法探究了推动脱钩的驱动因素;Chu等^[17]基于Tapio脱钩模型分析了2004—2019年湖北省工业用水与经济发展之间的脱钩关系,并基于Kaya恒等式和LMDI分解模型分析了驱动湖北省经济增长与工业用水脱钩的因素;姚园等^[18]基于Tapio脱钩模型和LMDI分解模型,对我国内地31个省级行政区2000—2020年第三产业经济发展与用水的脱钩时空演化及其驱动效应进行分析,并探究了驱动第三产业用水量变化的影响因素。现有关于经济发展与用水的脱钩时空演变及其驱动因素方面的研究已取得了一定成果,研究对象多集中于国家^[19]、流域^[20-21]、城市群^[22-23]及省市级^[24-25]层面,相关研究多围绕整体产业用水量与经济总量、单一产业(工业、第三产业等)用水与对应产业经济的脱钩关系展开,针对产业结构视角下用水脱钩时空演变特征及驱动因素的研究较为欠缺。

天津市是典型的资源型缺水城市,2023年人均水资源量仅为130.83 m³,约为全国人均水资源量的1/14,且时空分布不均,供需矛盾突出,日益严重的缺水问题逐步成为制约城市经济发展的重要因素。本文基于Tapio脱钩模型,分析了2020—2023年天津市产业用水量与经济发展脱钩状态的空间差异及各产业差异,并利用LMDI分解模型从技术效应、产业结构效应、单位水资源效益效应、节水效应和人口规模效应探究推动脱钩的驱动因素。

1 研究区概况

天津市地处太平洋西岸环渤海湾的华北平原东北部,海河流域最下游,东临渤海,北依燕山,位于38°34'N~40°15'N、116°43'E~118°40'E之间。现辖16个区,共124个街道、125个镇、3个乡,市辖区包括市内6区(和平区、河西区、南开区、河北区、河东区、红桥区)、环城4区(东丽区、西青区、北辰区、津南区)、外围5区(武清区、宝坻区、静海区、宁河区)及滨海新区,市域面积11 966.45 km²。天津市属暖温带半湿润大陆季风气候,年平均气温12.9℃,多年平均蒸发量为900~1 200 mm,多年平均降水量由南向北递增,为550~680 mm,夏季降水量约占全年降水量的80%,是海河五大水系的汇流处和入海口,素有“九河下梢”“河海要冲”之称。

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

本文数据来源于《天津市水资源公报(2020—2023年)》《天津市统计年鉴(2020—2023年)》。第一产业用水量对应农业用水量,第二产业用水量包括工业用水量和建筑业用水量,第三产业用水量对应服务业用水量。

2.2 研究方法

2.2.1 Tapio脱钩模型

运用Tapio脱钩模型探究天津市产业用水量与经济发展间的协调关系,并参照吴丹^[26]的研究,将经济发展与产业用水量划分为8种脱钩状态,具体判断标准如表1所示,基准年取2020年。

表1 Tapio脱钩状态体系判别标准
Table 1 Tapio decoupling status system discrimination criteria

脱钩类型	国民生产总值 变化率	产业用水量 变化率	脱钩弹性系数	脱钩判断
脱钩	>0	<0	≤0	强脱钩
	>0	>0	>0~>0.8	弱脱钩
	<0	<0	≥1.2	衰退性脱钩
负脱钩	<0	>0	≤0	强负脱钩
	<0	<0	>0~>0.8	弱负脱钩
	>0	>0	≥1.2	扩张性负脱钩
连接	>0	>0	>0.8~>1.2	增长连接
	<0	<0	>0.8~>1.2	衰退性连接

8种脱钩状态中,强脱钩表示水资源消耗不会随着经济增长而增加,是最理想的脱钩状态;强负脱钩表示经济呈增长状态,同时水资源消耗量增加,为最不利状态。

2.2.2 LMDI分解模型

结合天津市用水特征,影响产业用水量变化的

主要因素有用水强度、产业结构、单位水资源效益、节水水平、人口数量。因此,将用水量变化驱动因素分解为技术效应、产业结构效应、单位水资源效益效应、节水效应、人口规模效应,构建 LMDI 分解模型:

$$W_t = \sum_{i=1}^3 W_{it} = \sum_{i=1}^3 \frac{W_{it}}{G_{it}} \frac{G_{it}}{G_t} \frac{G_t}{W_t} \frac{W_t}{R_t} R_t = \sum_{i=1}^3 w_{it} g_{it} d_{it} l_t R_t \tag{1}$$

式中: W_t 为第 t 年产业用水量总量; W_{it} 为第 i 产业第 t 年的用水量; G_{it} 为第 i 产业第 t 年的生产总值; G_t 为第 t 年的国内生产总值; R_t 为第 t 年末该地区的常住人口; w_{it} 为单位生产总值用水量; g_{it} 为第 i 产业增加值与地区生产总值的比值; d_{it} 为单位水资源效益效应,表示水资源变化引起的生产总值变化; l_t 为节水效应,表示人均可利用水资源量。

产业用水量驱动效应加法分解模型为:

$$\Delta W_i = W_{it} - W_{i0} = \Delta W_w + \Delta W_g + \Delta W_d + \Delta W_l + \Delta W_R \tag{2}$$

式中: ΔW_i 为第 i 产业用水量的变化量; W_{i0} 为基准年第 i 产业的用水量; ΔW_w 为水资源利用效率变化引起的产业用水量变化,定义为技术效应; ΔW_g 为产业结构变化引起的产业用水量变化,定义为产业结构效应; ΔW_d 为单位水资源效益变化引起的产业用水量变化,定义为单位水资源效益效应; ΔW_l 为人均可利用水资源量变化引起的产业用水量变化,定义为节水效应; ΔW_R 为人口变化引起的产业用水量变化,定义为人口规模效应。具体计算过程参考文献[16]。

本文采用各驱动因素贡献值除以贡献值绝对值之和的比例表示贡献率,贡献率大于 1 表示促进用水量的增加,贡献率小于 1 表示抑制用水量的增加。

3 结果与分析

3.1 脱钩效应分析

利用 Tapio 脱钩模型计算 2021—2023 年天津市经济发展与用水量的脱钩关系,见表 2 和图 1,因市内 6 区没有第一产业,图 1(a)中该区域为空白。

从市级层面看,研究期内,天津市第一、二、三产业及总产业与产业用水量全部实现脱钩,其中第一产业和总产业与用水量处于强脱钩状态,说明在经济增长的同时水资源利用量减少;第二产业和第三

产业与用水量处于弱脱钩状态,且脱钩弹性系数小于 0.004,说明在第二产业和第三产业发展过程中水资源消耗量相对较少。总体来看,天津市经济发展与水资源利用脱钩态势良好,产业用水量效率较高。

从各区来看,2023 年,天津市各区总产业产值与用水量均呈脱钩状态,其中市内 6 区、北辰区、武清区、宝坻区、蓟州区呈强脱钩状态,其余区均呈弱脱钩状态。分产业来看,各区第一、二、三产业产值与用水量呈强脱钩、弱脱钩、弱负脱钩、强负脱钩 4 种状态,各种状态出现频率依次为 43.75%、37.5%、3.13%、15.63%。其中市内 6 区和滨海新区各产业产值与用水量均实现脱钩;环城 4 区中东丽区、西青区、津南区第一产业产值与用水量呈强负脱钩状态;外围 5 区中宝坻区和宁河区第二产业产值与用水量呈强负脱钩状态,宁河区第三产业产值与用水量呈弱负脱钩状态。另外,呈负脱钩状态区的第一、二、三产业产值占全市第一、二、三产业总产值的比例分别在 5%、3%、1.5% 以下,说明天津市产业发展优势不足的区,其产业产值与用水量脱钩状态表现欠佳。

3.2 用水量驱动力分解

3.2.1 市级层面

天津市产业用水量发展驱动效应分解结果及各驱动效应贡献率见表 3。

2023 年天津市总产业用水量各驱动效应绝对值排序为: $\Delta W_w > \Delta W_d > \Delta W_g > \Delta W_R > \Delta W_l$ 。结果表明:技术效应、节水效应和人口规模效应抑制了总产业用水量的增长,推动了总产业产值与用水量的脱钩,其中技术效应是其脱钩的关键因素,贡献率为 -47.07%;单位水资源效益效应和产业结构效应均促进了总产业用水量的增长,其中抑制脱钩的主要因素是单位水资源效益效应,贡献率为 38.99%。从时间维度来看,2021 年、2022 年、2023 年促进经济发展与产业用水量脱钩的主要因素均为技术效应,抑制脱钩的主要因素均为单位水资源效益效应,且各因素驱动效应方向较为一致,其中节水效应驱动方向存在年际间差异,2021 年和 2023 年表现为抑制因素,而 2022 年为促进因素,这是因为节水效应主要与人口数量和产业用水量有关,2022 年产业

表 2 天津市市级经济发展与产业用水量的脱钩状态

年份	第一产业		第二产业		第三产业		总产业	
	脱钩弹性系数	脱钩状态	脱钩弹性系数	脱钩状态	脱钩弹性系数	脱钩状态	脱钩弹性系数	脱钩状态
2021	-0.0183	强脱钩	0.0004	弱脱钩	0.0003	弱脱钩	-0.0003	强脱钩
2022	-0.0047	强脱钩	0.0001	弱脱钩	0.0000	弱脱钩	0.0000	强脱钩
2023	-0.0154	强脱钩	0.0001	弱脱钩	0.0002	弱脱钩	-0.0002	强脱钩

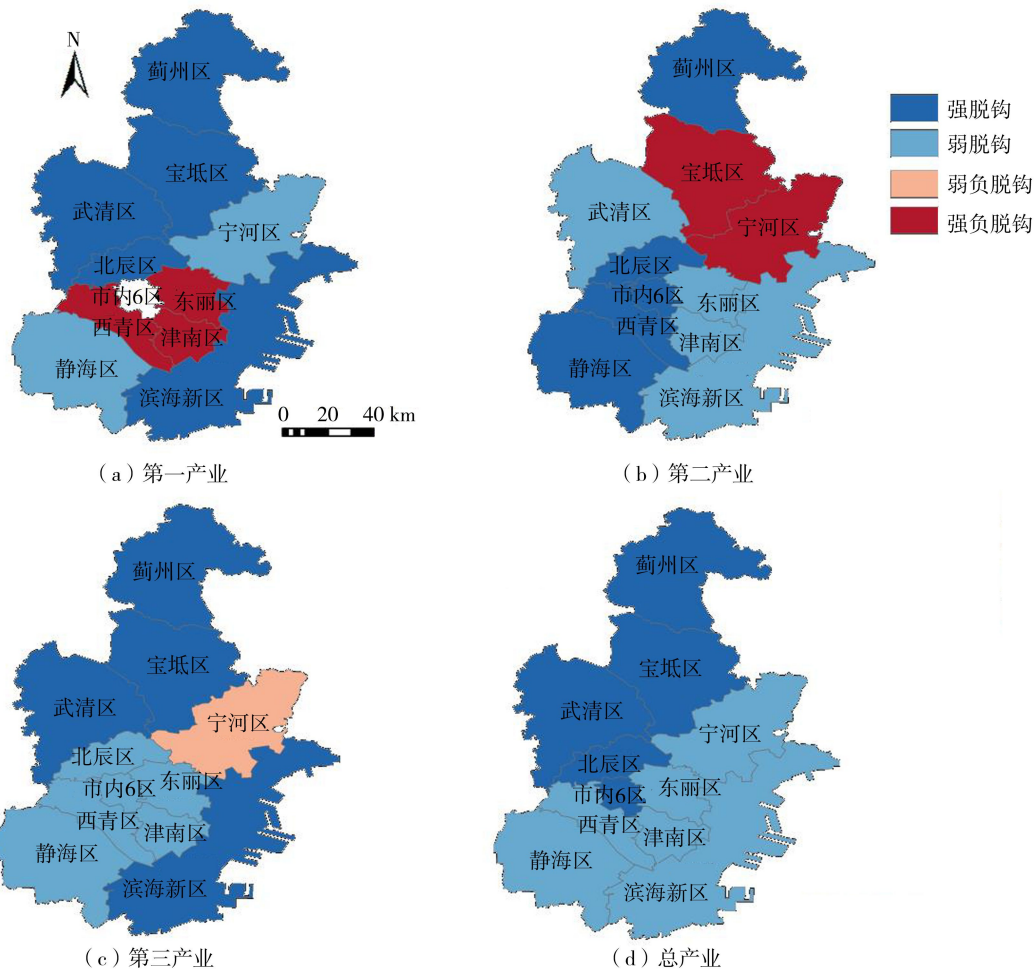


图 1 2023 年天津市各区经济发展与产业用水量的脱钩状态

Fig. 1 Decoupling state between economic development and water consumption in districts of Tianjin in 2023

表 3 2021—2023 年天津市产业用水量驱动效应分解量及贡献率

Table 3 Decomposition values and contribution rates of driving effects on industrial water consumption of Tianjin from 2021 to 2023

产业	驱动效应	分解量/亿 m ³			贡献率/%		
		2021 年	2022 年	2023 年	2021 年	2022 年	2023 年
第一产业	ΔW_w	-3.307	-2.945	-3.301	-53.21	-49.53	-52.19
	ΔW_g	1.187	1.220	0.652	19.10	20.51	10.31
	ΔW_d	1.414	1.459	2.062	22.75	24.53	32.60
	ΔW_l	-0.211	0.149	-0.148	-3.39	2.51	-2.34
	ΔW_R	-0.096	-0.174	-0.162	-1.55	-2.93	-2.56
第二产业	ΔW_w	-0.433	-0.877	-0.868	-30.01	-44.23	-41.09
	ΔW_g	0.151	0.267	0.092	10.47	13.49	4.35
	ΔW_d	0.705	0.686	1.002	48.89	34.61	47.43
	ΔW_l	-0.105	0.070	-0.072	-7.30	3.54	-3.41
	ΔW_R	-0.048	-0.082	-0.079	-3.33	-4.14	-3.72
第三产业	ΔW_w	0.045	-0.016	-0.025	10.66	-3.73	-4.83
	ΔW_g	-0.040	-0.068	-0.024	-9.38	-16.19	-4.67
	ΔW_d	0.278	0.274	0.410	65.68	65.55	78.68
	ΔW_l	-0.041	0.028	-0.029	-9.80	6.70	-5.65
	ΔW_R	-0.019	-0.033	-0.032	-4.48	-7.83	-6.17
总产业	ΔW_w	-3.695	-3.838	-4.194	-46.71	-46.74	-47.07
	ΔW_g	1.298	1.420	0.719	16.41	17.29	8.08
	ΔW_d	2.396	2.418	3.474	30.29	29.45	38.99
	ΔW_l	-0.358	0.247	-0.249	-4.52	3.01	-2.80
	ΔW_R	-0.163	-0.289	-0.273	-2.07	-3.52	-3.06

用水量较 2020 年增长-0.25%,人口较 2020 年增长-1.7%,用水量的增长率高于人口增长率。

分产业看,2021 年、2022 年、2023 年第一产业用水量变化均为降低,第二、三产业用水量变化均为增加。根据各驱动因素分解结果,3 年产业用水量各驱动因素驱动效应方向基本一致,其中 2023 年产业结构效应和单位水资源效益效应促进了第一、二产业用水量的增长;促进第三产业用水量增长的效应仅为单位水资源效益效应,其中单位水资源效益效应均是抑制第一、二、三产业产值与用水量脱钩的主要因素,贡献率分别为 32.60%、47.43%、78.68%;技术效应、节水效应和人口规模效应抑制了第一、二产业用水量的增长;技术效应、产业结构效应、节水效应和人口规模效应抑制了第三产业用水量的增长,即促进了产业产值与用水量的脱钩,其中技术效应是促进第一、二产业脱钩的主要因素,贡献率分别为-52.19%、-41.09%,人口规模效应是促进第三产业脱钩的主要因素,贡献率为-6.17%。

总的来看,天津市产业用水量脱钩情况整体良好,主要原因是 2019 年天津市印发实施《天津市节水行动实施方案》,并高位推动节水工作,将节水优先作为首要原则,大力发展节水技术,促进农业节水增效、工业节水减排、城镇节水降损,2023 年天津市

农田灌溉水有效利用系数为 0.723,用水总量为 32.72 亿 m^3 ,用水效率位于全国先进行列。从驱动因素分解结果来看,单位水资源效益效应是抑制经济发展与产业用水量脱钩的最主要因素,由此可知经济发展是导致用水增加的主要因素。

为实现区域可持续发展并促进第二、三产业由弱脱钩转向强脱钩,天津市需进一步加强用水总量和强度双控行动,引导高耗水行业转型升级;另外,在大力推进新质生产力的背景下,为把握新一轮科技革命和产业变革机遇,天津市应整合全市资源发展节水产业,推动建立以企业为主体、市场为导向、创新为动力、产学研用相结合的节水产业发展格局。

3.2.2 区级层面

如图 2(数据表示各区产业用水量各驱动效应分解量)和图 3 所示,不同区域用水量驱动效应的驱动力度存在一定区别,不同产业用水量的驱动效应也存在差别。

3.2.2.1 市内 6 区

2023 年天津市内 6 区用水量较 2020 年降低 0.187 亿 m^3 ,其中技术效应、产业结构效应、节水效应和人口规模效应均抑制了总产业用水量的增长,即促进总产业产值与用水量的脱钩,其中技术效应是促进脱钩的主要因素,贡献率为-37.27%;单位水

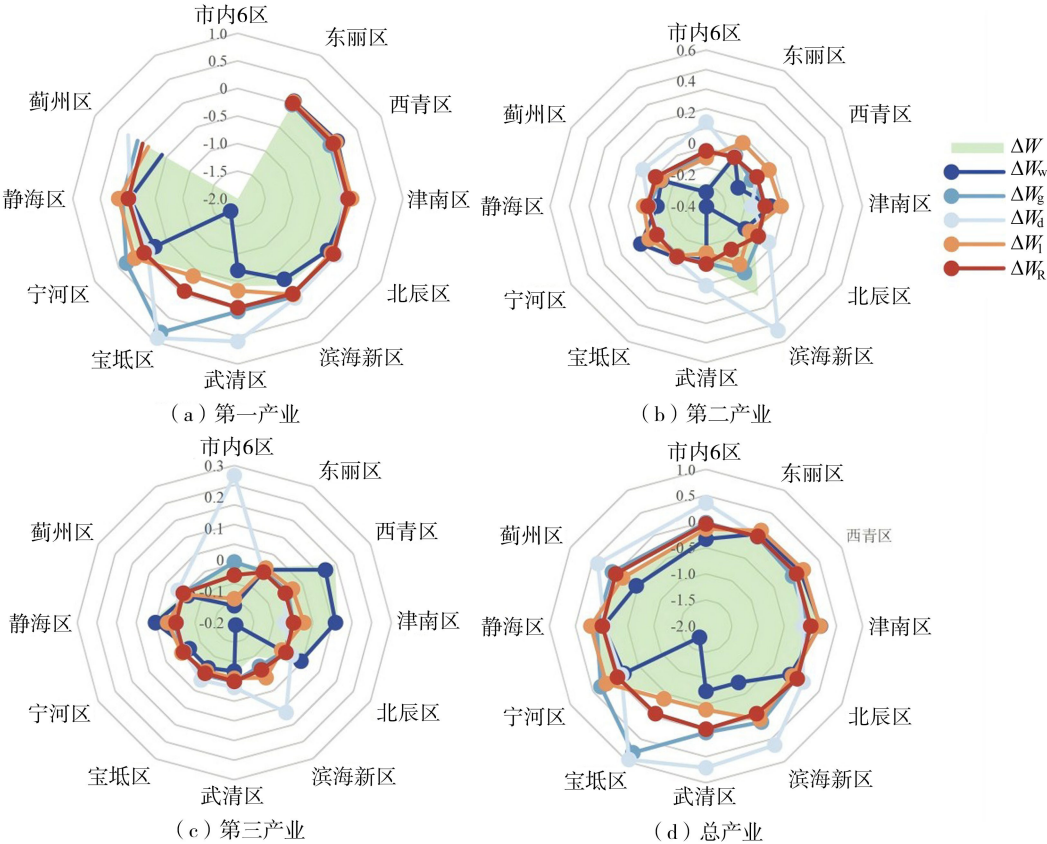


图 2 2023 年天津市各区产业用水量各驱动效应分解量

Fig. 2 Decomposition values of various driving effects on industrial water consumption by district in Tianjin of 2023

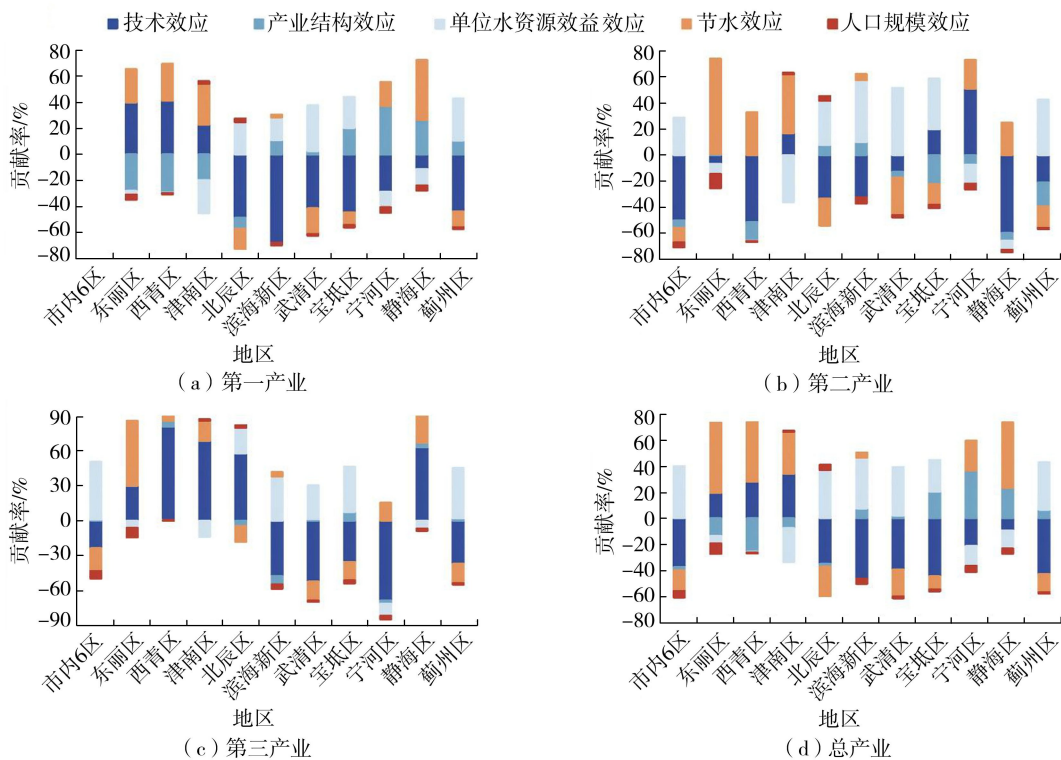


图 3 2023 年天津市各区产业用水量各驱动效应贡献率

Fig. 3 Contribution rates of various driving effects on industrial water consumption by district in Tianjin of 2023

资源效益效应促进了用水量的增长,即抑制了脱钩,贡献率为 39.57%。

分产业来看,单位水资源效益效应均为抑制第二、三产业产值与用水量脱钩的最主要因素,且其对第三产业的作用效应大于第二产业,这是因为市内 6 区产值以第三产业为主,第三产业产值是第二产业的 10 倍多,且与 2020 年相比,2023 年第三产业产值增加 15.33%,用水量增加 0.54%,第二产业产值增加 8.33%,用水量增加-34.5%,表明市内 6 区经济发展处于较高水平,经济发展是导致用水量增加的主要因素。建议开展水资源消耗总量和强度的双控行动,尤其是第三产业,应实施用水定额管理,推广合同节水管理和节水诊断服务,推动节水器具更新,提升水资源利用效率。

3.2.2.2 滨海新区

2023 年滨海新区用水量较 2020 年变化近似于 0,技术效应和人口规模效应均抑制了用水量的增长,即促进了总产业产值与用水量的脱钩,其中技术效应是促进脱钩的主要因素,贡献率为-46.08%;产业结构效应、单位水资源效益效应和节水效应均促进了用水量的增长,即抑制了总产业产值与用水量的脱钩,其中单位水资源效益效应是抑制脱钩的主要因素,贡献率为 38.62%。

分产业来看,单位水资源效益效应均为抑制第一、二、三产业产值与用水量脱钩的最主要因素,且

对第二产业的作用效应大于第三和第一产业。滨海新区是天津市经济发展的大区,2023 年地区生产总值约占天津市的 43%,第一、二、三产业生产总值比值为 1 : 22 : 39,总产业用水量约占天津市的 18%,说明经济发展是导致滨海新区用水量增加的主要因素。为实现经济的可持续发展,滨海新区应推广合同节水管理和节水诊断服务,严格执行特种行业用水价格,推动火力发电、钢铁、石化等高耗水企业使用非常规水源,提升水资源利用效率。

3.2.2.3 环城 4 区

2023 年环城 4 区用水量较 2020 年增加 0.358 亿 m^3 ,其中北辰区用水量下降 0.075 亿 m^3 ,东丽区、西青区、津南区用水量分别增加 0.095 亿、0.152 亿、0.187 亿 m^3 。产业结构效应和人口规模效应是影响环城 4 区总产业用水量变化的抑制因素,即促进了总产业产值与用水量的脱钩,其中产业结构效应是促进脱钩的主要因素;技术效应、节水效应和单位水资源效益效应是促进因素,即抑制了总产业产值与用水量的脱钩,其中节水效应是抑制脱钩的主要因素。

进一步分析呈负脱钩状态的区域,其中产业结构效应是促进东丽区、西青区第一产业与用水量脱钩的主要因素,单位水资源效益效应是促进津南区第一产业脱钩的主要因素;技术效应是抑制东丽区、西青区第一产业脱钩的主要因素,节水效应是抑制

津南区第一产业脱钩的主要因素。东丽区、西青区、津南区第一产业产值占天津市第一产业产值的比例较低,分别为 1.49%、4.16%、1.90%,且规模化程度较低。因此,建议东丽区和西青区强化农业用水刚性制度约束,优化调整农业产业结构;津南区应积极推广应用水肥一体化、滴灌、微灌等高效节水灌溉技术,确保全市农田灌溉水有效利用系数的提高。

3.2.2.4 外围 5 区

2023 年外围 5 区用水量较 2020 年降低 0.693 亿 m³,其中宁河区和静海区用水量分别增加 0.160 亿、0.187 亿 m³,武清区、宝坻区、蓟州区用水量分别下降 0.425 亿、0.454 亿、0.161 亿 m³。技术效应、节水效应和人口规模效应为影响外围 5 区总产业用水量变化的抑制因素,即促进了总产业产值与用水量的脱钩,其中技术效应是主要因素;产业结构效应和单位水资源效益效应是促进因素,其中单位水资源效益效应是抑制脱钩的主要因素。

进一步分析呈负脱钩状态的区域,产业结构效应是促进宝坻区第二产业与用水量脱钩的主要因素,单位水资源效益效应是促进宁河区第二产业脱钩的主要因素,技术效应是促进宁河区第三产业脱钩的主要因素,单位水资源效益效应是抑制宝坻区第二产业脱钩的主要因素,技术效应是抑制宁河区第二产业脱钩的主要因素,节水效应是抑制宁河区第三产业脱钩的主要因素。建议宝坻区在工业领域强化节水减排,推进取水权交易和合同节水管理服务,确保万元工业增加值用水量的下降;宁河区应在工业企业推广先进节水工艺、技术和装备,以及工业循环水利用,在服务业严格用水定额管理,提高节水器具普及率,在洗浴、洗车等行业严格执行特种行业用水价格,确保宁河区万元工业产值增加值用水量的下降。

4 结 论

a. 从市级层面看,天津市产业用水量与经济发展脱钩状态良好。2021 年、2022 年、2023 年天津市总产业产值与用水量呈强脱钩状态。第一、二、三产业产值与用水量全部实现脱钩,其中第一产业处于强脱钩状态,第二、三产业处于弱脱钩状态,3 年脱钩状态一致。从驱动因素来看,技术效应是促进天津市总产业与用水量脱钩的主要因素,单位水资源效益效应是抑制总产业与用水量脱钩的主要因素。分产业来看,单位水资源效益效应均是抑制第一、二、三产业与用水量脱钩的主要因素,技术效应是促进第一、二产业脱钩的主要因素,人口规模效应是促进第三产业脱钩的主要因素。

b. 从区级层面看,大部分区产业用水量与经济发展脱钩状态良好,但少数区的产业产值与用水量呈负脱钩状态。2023 年,天津市生产总值与产业用水量均呈脱钩状态,各区第一、二、三产业产值与产业用水量呈强脱钩、弱脱钩、弱负脱钩、强负脱钩 4 种状态。其中市内 6 区、北辰区、滨海新区、武清区、静海区和蓟州区第一、二、三产业产值与用水量均呈脱钩状态;东丽区、西青区和津南区第一产业,宝坻区第二产业,宁河区第二、三产业产值与用水量呈负脱钩状态,其他产业均呈脱钩状态。从驱动因素分析,技术效应是抑制东丽区、西青区第一产业和宁河区第二产业与用水量脱钩的主要因素,节水效应是抑制津南区第一产业和宁河区第三产业脱钩的主要因素,单位水资源效益效应是抑制宝坻区第二产业脱钩的主要因素。

参考文献:

[1] 张陈俊,吴雨思,庞庆华,等. 长江经济带用水量时空差异的驱动效应研究:基于生产和生活视角[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28 (12): 2806-2816. (Zhang Chenjun, Wu Yusi, Pang Qinghua, et al. Driving effect of spatial-temporal differences in water use in the Yangtze River economic zone from the perspective of production and domestic [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28 (12): 2806-2816. (in Chinese))

[2] 韩雁,贾绍凤,鲁春霞,等. 水资源与社会经济发展要素时空匹配特征:以张家口为例[J]. 自然资源学报, 2020, 35 (6): 1392-1401. (Han Yan, Jia Shaofeng, Lu Chunxia, et al. Spatiotemporal matching between water resources and social economy: a case study in Zhangjiakou [J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35 (6): 1392-1401. (in Chinese))

[3] 李政伟,安琪尔,高小涛,等. 我国分质供水现状与进展[J]. 水资源保护, 2025, 41 (6): 123-131. (Li Zhengwei, An Qier, Gao Xiaotao, et al. Present situation and progress of quality-divided water supply in China [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (6): 123-131. (in Chinese))

[4] 张陈俊,朱炯烨,陈洁,等. 基于 LMDI 的长江经济带用水量时空差异的驱动效应[J]. 水利经济, 2024, 42 (3): 14-20. (Zhang Chenjun, Zhu Jiongye, Chen Jie, et al. Driving effect of spatial-temporal difference in water consumption in the Yangtze River Economic Belt based on LMDI [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42 (3): 14-20. (in Chinese))

[5] 李映红,吴超. 习近平“四水四定”重要原则的系统辩证法及其创新意义[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2025, 27 (4): 20-27. (Li Yinghong, Wu Chao. The systematic dialectics and innovative significance of Xi

- Jinping's important principles of "defining city, land, population and production by water"[J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences), 2025, 27 (4):20-27. (in Chinese))
- [6] 许锴,陈东景. 基于水足迹的水资源利用与经济高质量发展脱钩关系研究[J]. 水利经济, 2024, 42(5):20-27. (Xu Nuo, Chen Dongjing. Research on decoupling relationship between water resource utilization and high-quality economic development based on water footprint [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42 (5):20-27. (in Chinese))
- [7] 王凤婷,方恺,于畅. 京津冀产业能源碳排放与经济增长脱钩弹性及驱动因素:基于 Tapio 脱钩和 LMDI 模型的实证[J]. 工业技术经济, 2019, 38(8):32-40. (Wang Fengting, Fang Kai, Yu Chang. Decoupling between industrial energy-related carbon emissions and economic growth and its driving factors in Beijing, Tianjin and Hebei urban agglomeration: empirical study based on Tapio decoupling and LMDI model [J]. Journal of Industrial Technology and Economy, 2019, 38 (8): 32-40. (in Chinese))
- [8] 左其亭,刘佳政,蒋国栋,等. 中国水资源行为二氧化碳碳排放与经济增长二维脱钩分析[J]. 水资源保护, 2024, 40(6):1-9. (Zuo Qiting, Liu Jiazheng, Jiang Guodong, et al. Two-dimensional decoupling analysis of water resource behavior carbon dioxide emission and economic growth in China [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(6):1-9. (in Chinese))
- [9] 纪义虎,左其亭,马军霞. 基于 Tapio 和 LMDI 模型的沁河流域碳排放与水资源利用脱钩关系分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(4):94-101. (Ji Yihu, Zuo Qiting, Ma Junxia. Analysis of decoupling relationship between carbon emissions and water resources utilization in the Qinhe River Basin based on Tapio and LMDI models [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (4): 94-101. (in Chinese))
- [10] 钟妮栖,夏瑞,张慧,等. 黄河流域城市群水资源利用与经济发展脱钩关系研究[J]. 环境科学研究, 2024, 37(1):102-113. (Zhong Nixi, Xia Rui, Zhang Hui, et al. Research on the decoupling relationship between water resources utilization and economic development in urban agglomerations of the Yellow River Basin [J]. Research of Environmental Sciences, 2024, 37 (1): 102-113. (in Chinese))
- [11] 王幸,张晓力,刘翔宇. 黄河流域环境规制对水资源利用效率的影响研究[J]. 水利经济, 2024, 42(6):43-49. (Wang Xing, Zhang Xiaoli, Liu Xiangyu. Research on impact of environmental regulations on water resources utilization efficiency in the Yellow River Basin [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42 (6): 43-49. (in Chinese))
- [12] 彭虹,黄攀攀,张万顺,等. 重庆市农业用水量与农业经济发展脱钩程度的时空变化[J]. 水资源保护, 2020, 36(2):13-20. (Peng Hong, Huang Panpan, Zhang Wanshun, et al. Spatial-temporal change characteristics of decoupling between agricultural water consumption and agricultural economic development in Chongqing [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2):13-20. (in Chinese))
- [13] Shi Changfeng, Wang Yanying, Zhang Chenjun, et al. Spatial-temporal differences in water footprints of grain crops in northwest China: LMDI decomposition analysis [J]. Water, 2019, 11(12):2457.
- [14] 韩文艳,陈兴鹏,张子龙. 基于脱钩理论的城市水资源利用与经济增长关系研究[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5):140-145. (Han Wenyan, Chen Xingpeng, Zhang Zilong. Research on relationship between urban water use and economic growth based on decoupling analysis theory [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37 (5):140-145. (in Chinese))
- [15] 王建民,王理想,彭菲,等. 长三角地区碳排放驱动因素的经济效应测度[J]. 环境科学, 2025, 46(10):6162-6172. (Wang Jianmin, Wang Lixiang, Peng Fei, et al. Economic effect measurement of driving factors of carbon emission in Yangtze River Delta Region [J]. Environmental Science, 2025, 46(10):6162-6172. (in Chinese))
- [16] 刘羽,朱记伟,卢楠. 珠三角城市群用水量与经济增长的脱钩状态及其驱动因素研究[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(1):91-99. (Liu Yu, Zhu Jiwei, Lu Nan. Decoupling state of water consumption and economic growth in the Pearl River Delta and its driving factors [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023, 34(1):91-99. (in Chinese))
- [17] Chu Yijing, Wang Yingying, Zhang Zucheng, et al. Decoupling of economic growth and industrial water use in Hubei Province: from an ecological-economic interaction perspective [J]. Sustainability, 2022; 14(20):13338.
- [18] 姚园,李海红,李激,等. 基于脱钩指数和 LMDI 的第三产业用水量发展研究[J]. 水资源与水工程学报, 2024, 35(1):71-81. (Yao Yuan, Li Haihong, Li Wei. Development of water use of the tertiary industry based on Tapio decoupling and LMDI [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2024, 35(1):71-81. (in Chinese))
- [19] Du Boyu, Guo Xiaoqian, Liu Guwang, et al. China's water intensity factor decomposition and water usage decoupling analysis [J]. Applied Sciences, 2022, 12(14):7039.
- [20] 李汝资,白映,周云南,等. 黄河流域水资源利用与经济增长脱钩及影响因素分解[J]. 地理科学, 2023, 43(1):110-118. (Li Ruzi, Bai Yi, Zhou Yunnan, et al. Decoupling and decomposition of driving factors of water resources utilization and economic growth in the Yellow River Basin [J]. Geographical Science, 2023, 43(1):110-118. (in Chinese))

Protection,2024,40(5):46-52. (in Chinese))

[28] 宋天旭,刘家宏,梅超,等. 极端降雨下地下空间淹水对城市内涝过程的影响研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2024,32(2):349-364. (Song Tianxu, Liu Jiahong, Mei Chao, et al. Research on the influence of underground space on urban waterlogging in extreme rainfall [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2024, 32(2): 349-364. (in Chinese))

[29] 周婷,汪炎,邹俊,等. 基于 PCA 和 SVM 的遥感影像水体提取方法及验证[J]. 水资源保护,2023,39(2):180-189. (Zhou Ting, Wang Yan, Zou Jun, et al. PCA and SVM-based algorithm of water area extraction from remote sensing images and its verification [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 180-189. (in Chinese))

[30] 李宾,栾清华,李涛,等. 协同 MIKE11-KF 的遥感河道流量数据同化[J]. 河海大学学报(自然科学版),2026,54(2):18-27. (Li Bin, Luan Qinghua, Li Tao, et al. Remote sensing river discharge data assimilation with MIKE11-KF [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2026, 54(2): 18-27. (in Chinses))

[31] 冯佑斌,何颖清,潘洪洲. 基于高分三号的北江洪水水域提取方法及应用[J]. 水资源保护,2025,41(3):101-110. (Feng Youbin, He Yingqing, Pan Hongzhou. Method for water area extraction of Beijiang River floods based on GF-3 images and its application [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(3): 101-110. (in Chinese))

[32] Chapi K, Singh V, Shirzadi A, et al. A novel hybrid artificial intelligence approach for flood susceptibility assessment [J]. Environmental Modelling & Software,

2017,95:229-245.

[33] 杨广西,张轩庄,由淑明,等. 水陆联合快速封堵技术在团洲垸特大决口抢险中的应用[J]. 人民黄河,2024,46(增刊2):38-39. (Yang Guangxi, Zhang Xuanzhuang, You Shuming, et al. Application of rapid land-water joint sealing technology in emergency response to the major breach at tuanzhou enclosure [J]. Yellow River, 2024, 46(S2): 38-39. (in Chinese))

[34] 冯宝飞,曾明,张虎,等. 长江 2024 年第 1 号洪水预报调度复盘[J]. 人民长江,2024,55(12):2-7. (Feng Baofei, Zeng Ming, Zhang Hu, et al. Retrospective analysis of flood forecast and reservoir operation during 2024 Changjinag River No. 1 flood [J]. Yangtze River, 2024, 55(12): 2-7. (in Chinese))

[35] 王雨洁,李致家,姚成,等. 基于分布式水文水动力耦合模型的秦淮河流域洪水模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(2):11-18. (Wang Yujie, Li Zhijia, Yao Cheng, et al. Flood simulation in the Qinhuai River Basin based on a coupled distributed hydrological and hydrodynamic model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(2): 11-18. (in Chinese))

[36] 张旭旻,瞿思敏,李倩,等. 基于协整理论的淮河流域上游洪水预报实时校正方法[J]. 水资源保护,2022,38(6):88-95. (Zhang Xumin, Qu Simin, Li Qian, et al. Real-time correction method of flood forecasting for the upper Huaihe River Basin based on cointegration theory [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6): 88-95. (in Chinese))

(收稿日期:2025-09-10 编辑:胡新宇)

+++++

(上接第 231 页)

[21] 高明国,陆秋雨. 黄河流域水资源利用与经济发展脱钩关系研究[J]. 环境科学与技术,2021,44(8):198-206. (Gao Mingguo, Lu Qiuyu. Decoupling relationship between water resources utilization and economic development in the Yellow River Basin [J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(8): 198-206. (in Chinese))

[22] 路娜,伊丽努尔·阿力甫江,冯平平. 西北五省省会城市水资源利用与经济发展脱钩分析[J]. 干旱区资源与环境,2022,36(12):107-112. (Lu Na, Ilnur Ghalip, Feng Pingping. Decoupling relations between water resources utilization and economic development in the capital cities of five northwestern provinces [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(12): 107-112. (in Chinese))

[23] 沈瑞华,姚磊. 基于脱钩分析的 2004—2017 年京津冀城市群水足迹与经济协调关系研究[J]. 西安理工大学学报,2022,38(4):507-518. (Shen Ruihua, Yao Lei. Decoupling analysis of water footprint and economic development in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration from 2004 to 2017 [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2022, 38(4): 507-518. (in Chinese))

[24] 陈述,汪钟铃,颜克胜,等. 湖北省水资源压力与经济发展脱钩的时空演化[J]. 水资源保护,2023,39(3):134-141. (Chen Shu, Wang Zhongling, Yan Kesheng, et al. Spatio temporal evolution of decoupling between water resources stress and economic development in Hubei [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 134-141. (in Chinese))

[25] 郑炎辉,何艳虎,王金杰,等. 基于脱钩理论的区域产业节水目标研究:以广东省为例[J]. 水资源与水工程学报,2021,32(4):38-44. (Zheng Yanhui, He Yanhu, Wang Jinjie, et al. Study on the regional industrial water-saving target based on decoupling theory: a case study of Guangdong Province [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32(4): 38-44. (in Chinese))

[26] 吴丹. 中国经济发展与水资源利用脱钩态势评价与展望[J]. 自然资源学报,2014,29(1):46-54. (Wu Dan. Evaluation and prospect on the decoupling trend of economic development and water resource utilization in China [J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(1): 46-54. (in Chinese))

(收稿日期:2025-09-29 编辑:胡新宇)